文章编号:1000-4939(2024)02-0404-07

不同类风场雨滴冲击荷载对输变电塔线体系动力响应的影响研究

王辉[1,2],戴根[1],张鑫[1]

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院,230009 合肥; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室,510640 广州)

摘 要:输变电塔体系遭受风雨耦合作用破坏时常将原因归于风荷载,忽略了雨荷载耦合激励的放大效应。针对某输电线路“一塔两线”体系模型,以数值方法模拟良态风雨场与湿下击暴流场的风雨时程荷载,分别对塔线体系进行动力响应分析,结果表明:降雨对输电塔线体系的响应,具有显著影响,随着雨强变大,塔线体系响应增大明显;在极值降雨条件下,湿下击暴流场塔顶位移增幅最大,在 X 向和 Y 向分别达到 31.30% 和 33.93%;两种风雨场中塔顶位移及加速度功率谱密度均出现明显增幅,体系共振响应增强,塔身关键位置主材应力分别增大了 11.64%、37.07%;在不同类风场中,强降雨时雨滴冲击对塔线体系产生的激励增大作用不可忽略。

关键词:塔线体系;风雨荷载;良态风雨场;湿下击暴流;动力响应分析

中图分类号:TU312 +.1;V211.3 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.014

Influence of raindrop impact load on dynamic response of transmission tower line system in different wind fields

WANG Hui[1,2], DAI Gen[1], ZHANG Xin[1]

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, 230009 Hefei, China;
2. State Key Lab of Subtropical Building Science, South China University of Technology, 510640 Guangzhou, China)

Abstract: The damage of transmission and transformation tower system under wind-rain coupling often attributes to wind load, ignoring the amplification effect of rain load coupling excitation. Based on the tensioning tower system model of a transmission line, the time-history loads of wind and rain in a normal weather field and a wet downburst field are simulated. The dynamic response analysis of the tower-line system is carried out. The results show that the rainfall has a significant impact on the response of the transmission tower-line system. With the increase of rainfall intensity, the response of the tower-line system increases obviously. Under the condition of extreme rainfall, the displacement of tower top in wet downburst field increased by 31.30% in X direction and 33.93% in Y direction, respectively. The displacement and acceleration power spectral density of the tower top increased significantly in both wind

收稿日期:2021-05-16 **修回日期**:2022-08-29
基金项目:亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题项目(No. 2020ZB24);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2011]1568 号);安徽省自然科学基金资助项目(No. 11040606M116)
通信作者:王辉,教授。E-mail:hfutwh@sina.com
引用格式:王辉,戴根,张鑫. 不同类风场雨滴冲击荷载对输变电塔线体系动力响应的影响研究[J]. 应用力学学报,2024,41(2):404-410.
WANG Hui, DAI Gen, ZHANG Xin. Influence of raindrop impact load on dynamic response of transmission tower line system in different wind fields[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(2):404-410.

and rain fields, and the resonance response of the system was enhanced. The stress of the main material at the key position of the tower increased by 11.64% and 37.07%, respectively. In different wind fields, the increasing incentive effect of raindrop impact on tower-line system during heavy rainfall cannot be ignored.

Key words: tower-line system; wind-rain load; normal wind and rain; filed wet downburst; dynamic response analysis

输电塔线体系是电能输送的载体,因其具有轻质、高柔、小阻尼的特性,在极端气象条件下容易发生疲劳损伤和倒塌破坏[1],而事故调查分析往往将原因归结于强风作用。由于强风通常伴随强降雨,降雨对结构动力响应的影响显著[2],因此有必要针对不同类型的风场,对输电塔线体系受风雨作用效应开展深入研究,为电力设施抵抗强风雨作用的设计提供依据。

目前,有关输电塔线体系抗风雨研究还比较缺乏。对于良态风场,文献[3]对输电塔线路的风雨激振特性进行实验研究,表明降雨具有显著荷载效应。文献[4]考虑降雨分类,建立输电塔线体系的风雨激励动力分析模型,分析降雨对结构响应的贡献程度。上述研究为深入揭示风雨对塔线体系的作用机理奠定了基础。而对于下击暴流,其属于特异风,相较于良态风存在显著差异,具有对流空间小、突发性强、瞬间风力大的特点,而湿下击暴流还会伴随强降雨,对构筑物产生的影响仍然缺乏必要认识。文献[5]对输电塔线在下击暴流作用下的受力特征及影响参数进行研究,但未考虑降雨荷载的影响。文献[6]利用非高斯随机过程方法,模拟湿下击暴流的雨滴冲击荷载,为湿下击暴流对塔线体系的作用研究提供理论方法。文献[7]对输电线路受下击暴流风雨作用的振动特性进行分析,但未涉及塔线体系。

由于雨滴冲击力受重力及风力双重驱动作用,不同风场结构类型的风雨对塔线体系的作用必然存在差异。本研究以"一塔两线"体系模型为对象,针对两种风场伴随不同降雨,模拟风雨对塔线体系的动力作用,从塔身的塔顶位移响应均方根、功率谱以及主材应力等角度分析,获取相关特性。

1　风雨荷载模拟理论方法

1.1　风荷载

对于良态风,采用谐波叠加法进行脉动风模拟。对于下击暴流风,可以看作由平均部分和具有随机性的脉动部分组成。其平均部分风速具有时变特征,可由竖向风剖面分布函数与时间函数的相乘获得,即

$$\bar{U}(z,t) = V(z)f(t) \tag{1}$$

式中:$V(z)$ 为竖向风剖面在该高度处的最大风速;$f(t)$ 为描述数值风剖面变化的时间函数。

$$f(t) = |V_c(t)| / \max|V_c(t)| \tag{2}$$

式中:$V_c(t)$ 为合成风速,根据文献[8]提出的矢量合成方法,空间一点 P 的风速为径向风速 $V_r(r,t)$ 与风暴移动速度 V_t 的矢量和。

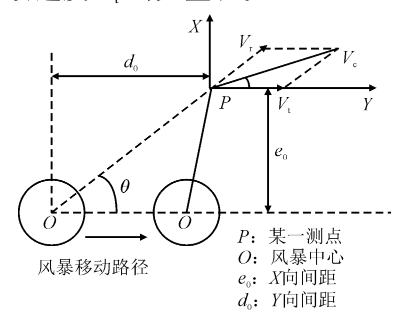


图 1　风速矢量合成图

Fig. 1　Wind speed vector synthesis diagram

非平稳脉动风速可表示为调制函数和平稳高斯随机过程的乘积[9]。

$$u(x,y,z,t) = a(x,y,z,t)k(x,y,z,t) \tag{3}$$

式中:$a(x,y,z,t) = (0.08 \sim 0.11)\bar{U}(x,y,z,t)$,其为平均风乘以经验系数(0.08 ~ 0.11);$k(x,y,z,t)$ 为频谱特征不随时间改变且服从标准正态分布的高斯随机过程。

由两种风雨场各高度点的风速时程可确定结构所受风荷载时程,即

$$F_f(z,t) = \mu_r \mu_s A_s \left(\frac{1}{2}\rho V_t^2\right) \tag{4}$$

式中:μ_r 为 50 年重现期调整系数 1.0;ρ 为空气密度;μ_s 为风荷载体型系数;A_s 为体系结构迎风面积。

1.2　雨荷载

按每小时降雨量对雨强等级进行分类,如表 1 所示。结合已有实测数据和研究分析,单位体积中雨滴的分布情况可由 M-P 谱分布确定,即

$$n(d) = n_0 e^{-\Lambda d} \tag{5}$$

式中：$n_0 = 8 \times 10^3$ 个 · m^{-3} · mm^{-1}；斜率因子 $\Lambda = 4.1 I^{-0.21}$，这里 I 为雨强（mm/h）。

单个雨滴的作用力为

$$F(\tau) = \frac{mV_s}{\tau} = \frac{1}{6\tau}\rho_w \pi d^3 V_s \tag{6}$$

式中：τ 为雨滴撞击结构持续时间；d 为雨滴直径；V_s 为雨滴撞击前的末速度。

模拟时将雨滴作用力转化为构件表面的均布面荷载，即

$$F_d = F(\tau)/Ab\alpha \tag{7}$$

式中：A 为雨滴截面面积，$A = \pi d^2/4$；α 为雨滴空气中占有率，取 $\alpha = 1/6\pi d^3 N$。雨滴的作用力可以表示为顺风向和竖直方向，顺风向雨滴速度趋于风速，竖直方向速度趋于自由下落速度，与雨滴粒径、阻力系数、雨滴密度和空气密度相关。

表1 不同降雨等级降雨量

Tab.1 Paindall for different levels of rainfall

参数	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨			
					弱	中	强	极值
降雨量/(mm · h^{-1})	2.5	8	16	32	64	100	200	709.2

2 结构及荷载模型

2.1 塔线体系模型

以南方某地区110 kV输电线路耐张塔为对象，塔高45.5 m，塔腿根开为10.42 m×10.42 m，水平档距为400 m，线路两端无高度差。塔体主材及辅材分别采用Q345、Q235角钢，弹性模量均为206 GPa；输电导线截面积3.8 cm^2，弹性模量10.1 GPa；建立梁杆混合模型，对于主材位置采用B31空间梁单元建模，辅材及导线建模选用T3D2单元，体系整体有限元模型如图2所示。

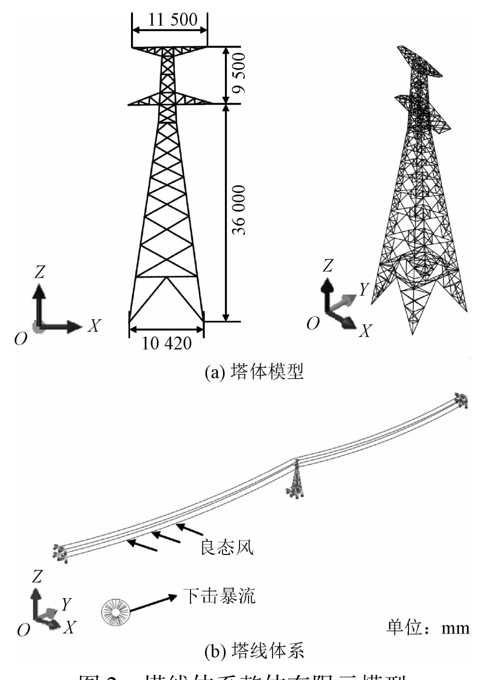


图2 塔线体系整体有限元模型

Fig.2 Integral finite element model of tower line system

对塔线体系进行模态分析，获取塔体及导线的一阶振型频率，以反应体系的动力特性，其结果如表2所示。

表2 体系动力特性

Tab.2 System dynamic characteristics

阶数	部位	频率/Hz	振型
1阶	塔体	2.715	平面外 X 向弯曲
		2.921	平面内 Y 向弯曲
1阶	导线	0.235	出平面振动
		0.258	平面内振动

2.2 风雨荷载

对于良态风，输电塔所在地为B类地貌（$\alpha = 0.15$），10 m高度处设计风速 $v_{10} = 27$ m/s；风速谱采用Davenport谱；时间步长 $\Delta t = 0.125$ s，截取频率上限 $\omega_{up} = 8\pi$，采样频率点数 $N = 4\,096$。按上述条件模拟获得塔线体系各高度点脉动风时程[10]，由图3可知，模拟风速的功率谱和理想谱能较好吻合。

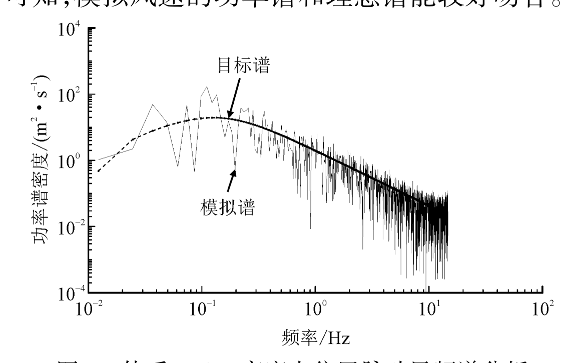


图3 体系7.5 m高度点位置脉动风频谱分析

Fig.3 Frequency spectrum analysis of fluctuating wind at 7.5 m altitudes

对于下击暴流风，模拟参数取 $V_t = 8$ m/s，最大径向风速取 $V_{r,max} = 47$ m/s，特征距离 $r = 700$ m，模

拟时长为 900 s。体系与风暴中心初始相对 d_0 = 3 500 m,e_0 = 600 m,下击暴流中心相对体系移动状态见图 4。叠加平均以及脉动风得到体系不同高度处综合风速时程。

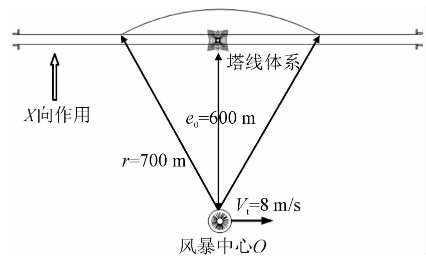


图 4　下击暴流运动示意图

Fig. 4　Schematic diagram of downburst movement

根据表 3 对体系进行分段,塔体 μ_s 取 2.36,导线 μ_s 为 1.1,按公式(4)将风速时程转换为风力时程,以集中力的形式施加于结构进行动力响应分析。

表 3　塔身分段信息

Tab. 3　Segmentation information of tower body

分段编号	分段区间/m	高度/m	横截面积/m²
1	0 ~ 7.5	7.5	6.99
2	7.5 ~ 17.5	17.5	8.64
3	17.5 ~ 24	24	5.06
4	24 ~ 29.2	29.2	3.59
5	29.2 ~ 33	33	2.66
6	33 ~ 36	36	1.99
7	36 ~ 38	38	1.16
8	38 ~ 41	41	2.37
9	41 ~ 44	44	1.22
10	44 ~ 45.5	45.5	0.63

良态风荷载的水平向力起控制作用,其加载方向为垂直导线(X 向)。对于下击暴流风,风暴相对输电塔线体系移动时,由于风向角不断变化,故将风荷载分解为垂直导线(X 向)与顺导线(Y 向)分力并施加于作用点上。雨滴冲击荷载作为附加荷载,假定其为时均力。

3　计算结果与分析

对塔线体系风雨荷载作用下的动力响应进行有限元模拟,分析不同风雨耦合环境下雨滴冲击荷载对塔线体系的激励影响。

3.1　风雨作用响应分析

塔线体系受风雨激励产生的最大位移出现于塔顶位置,图 5 给出了两类风场环境下无降雨及极值降雨时塔顶位移时程。由图可知,对于良态风雨作用,整体位移时程均值出现明显上移,塔顶在 22 s 及 110 s 分别出现 82 mm 及 78 mm 的位移;在湿下击暴流场中,受极值降雨影响,各向位移幅值显著增加;沿 X 向,随着风暴中心不断向塔线体系靠近,塔顶位移分量先增大,之后随暴风雨远离塔线体系而减小,位移主要出现在湿下击暴流作用的 180 s 至 700 s 区间内,并在 400 s 及 510 s 处出现了 130 mm 及 132 mm的极限位移;沿 Y 向,由于风暴移动导致与塔顶的风向角不断改变,在 200 ~ 400 s 及 500 ~ 600 s 两个区段内位移响应波动剧烈,并出现两个方向相反的位移峰值,在 340 s 时出现正向 84 mm 的位移量,410 s 时则出现负向 26 mm 的位移量。

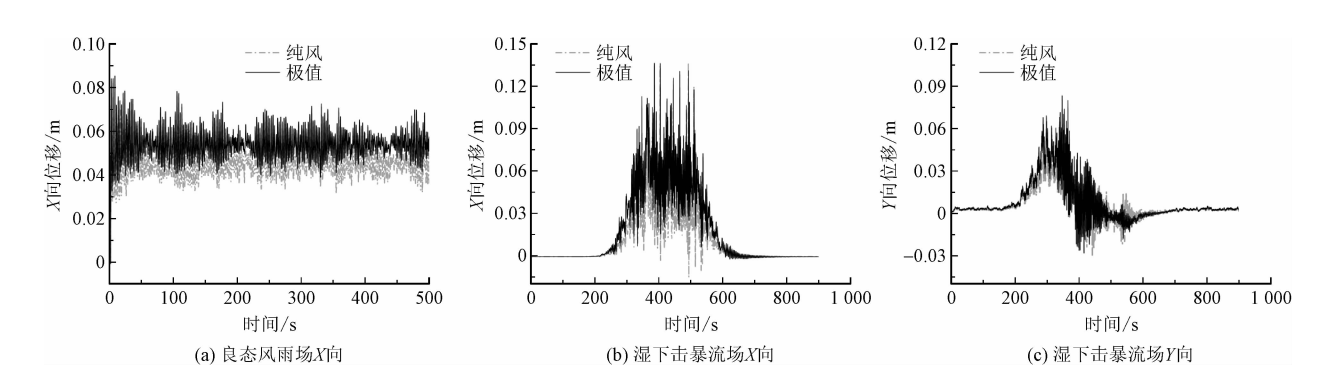


图 5　塔顶位移时程

Fig. 5　Displacement time history of tower top position

表 4 给出了纯风和不同降雨时塔顶位移均方根值。降雨强度较小时,两类风雨环境中雨压荷载引起的位移均方根值增幅均较小。当雨强增大至大暴雨强度时,塔顶位移均方根值出现显著增大;极值降雨时,良态风雨场中输电塔顶 X 向位移均方根增大 19.74%,而湿下击暴流场中塔顶 X 向增大 31.30%,Y 向增大

33.93%。雨压荷载对体系的各向加速度也有明显激励效应。由图6可知,极值降雨条件下,良态风雨场中塔顶 X 向加速度均值和峰值增大明显;对于湿下击暴流场,随着风暴移动,加速度有明显的时效性,集中出现于暴风雨靠近塔线体系的时段内,加速度峰值在 X 向可达 1.8 m/s^2,在 Y 向可达 1.9 m/s^2,对结构和导线产生不利影响。

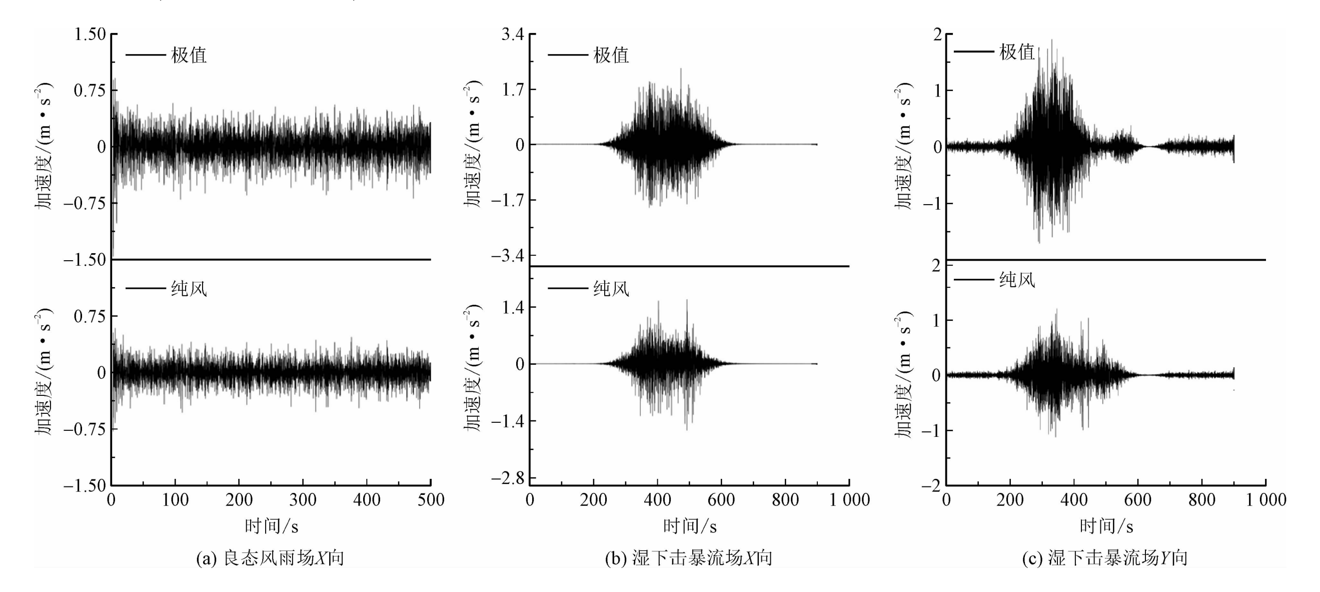


图6 塔顶加速度时程

Fig. 6 Acceleration time history of tower top position

表4 塔顶位移均方根对比

Tab. 4 Comparison of root mean square of tower top displacement

风雨场类别	位移均方根/mm	荷载类型								
		无雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨			
							弱	中	强	极值
良态风雨场	X 向位移	45.39	45.66	45.94	46.21	46.63	47.21	47.84	49.55	54.34
	增幅/%		0.61	1.21	1.81	2.74	4.17	5.42	9.18	19.74
湿下击暴流场	X 向位移	21.69	21.95	22.08	22.26	22.83	23.61	24.45	25.45	28.49
	增幅/%		1.13	1.18	2.57	5.19	8.80	12.69	17.28	31.30
	Y 向位移	12.31	12.58	12.86	13.26	13.80	14.02	14.55	14.89	16.49
	增幅/%		2.14	4.41	7.76	12.07	13.69	17.76	20.83	33.93

3.2 响应频谱分析

结合体系模态分析结果,利用功率谱描述雨压荷载对体系非线性动力响应的贡献[11]。图7和图8分别给出了塔线体系在纯风作用和两类风雨环境下的塔顶位移及加速度功率谱。图7表明塔线体系受纯风作用时位移功率谱分布在低频处与风速谱形状相近,存在较高的能量分布,该部分为背景响应,主要体现为外界风荷载对体系的作用。纯风与极值降雨情况下的谱总体分布大致相似,区别主要为后者较前者密度峰值提高。在极值降雨条件下,良态风雨场中塔顶 X 向位移功率谱在0.393、0.851及1.312 Hz处出现凸起的尖峰,表明塔线体系在这些频点附近产生共振响应,体现了风雨荷载对体系的动力作用。对于湿下击暴流场,塔顶位移功率谱密度在两个方向均有大幅提高,在 X 向的0.329、0.659、2.187 Hz处,以及 Y 向的0.351、0.668、2.231 Hz处出现功率谱峰值。X 向出现峰值的频点相对于 Y 向偏低,分析是由于 X 向导线受风雨荷载作用面积更大,且导线对体系平面外刚度约束较小。在两种风雨场中,共振频点相较于塔体自振频率提前,表明对于刚度较大的耐张塔线体系,在强风雨荷载的激

励下,体系在低频处便发生多次平面内外振动。在纯风与极值降雨状态下,塔顶加速度功率谱总体分布也较为相似,但后者在密度峰值上出现较大的增幅效应(图 8),表明塔线体系受雨荷载的激励作用后,整个体系的振动加速度响应明显提高。良态风雨场中的加速度功率谱能量主要集中在低频区间,高于 3 Hz 的区域分布比较少;对于湿下击暴流场中,在超过塔体自振频率的频率区域仍有较大的频谱密度分布,表明其对塔线体系的破坏作用更大。

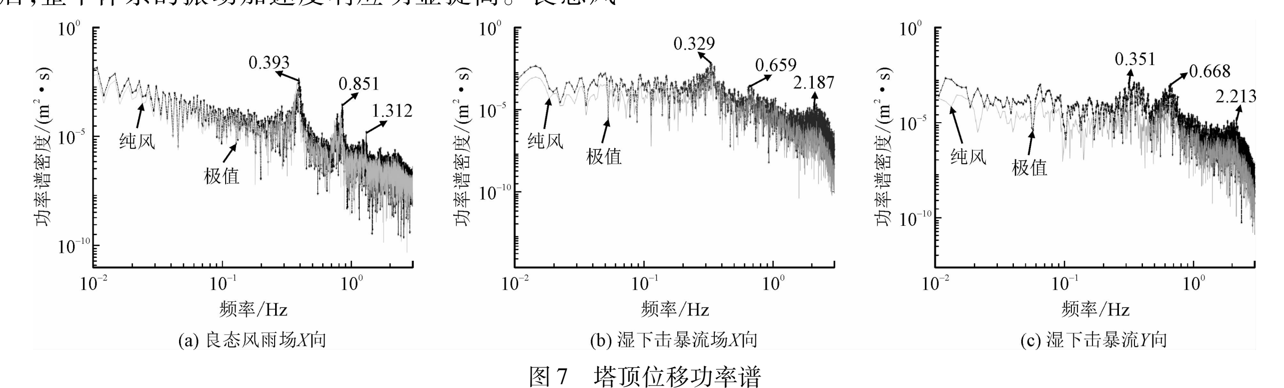


图 7　塔顶位移功率谱

Fig. 7　Power spectrum of tower top displacement

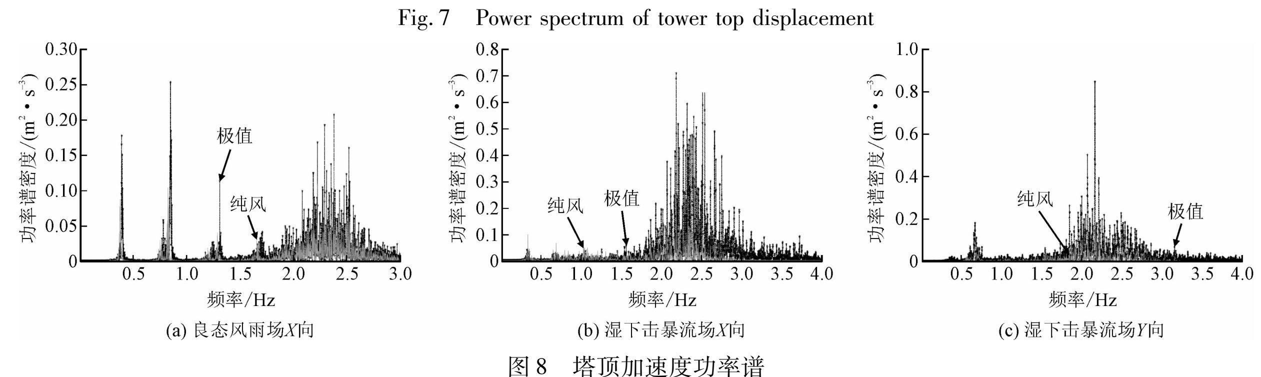
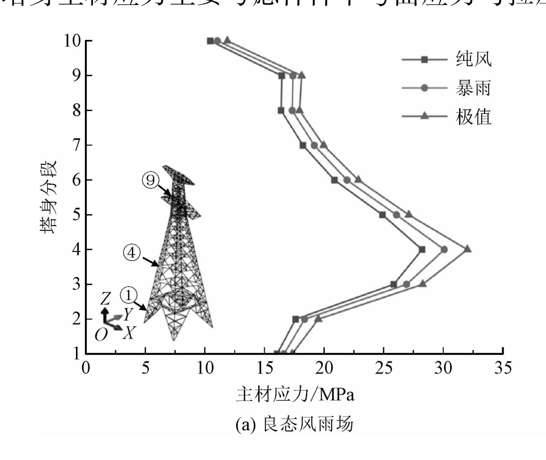


图 8　塔顶加速度功率谱

Fig. 8　Power spectrum of tower top acceleration

3.3　体系应力分布

塔身主材应力主要考虑杆件中弯曲应力与拉压应力的组合,在风雨作用下,塔身主材应力沿高度变化较明显,提取塔身各分段沿 X 向受拉主材单元应力,如图 9 所示。



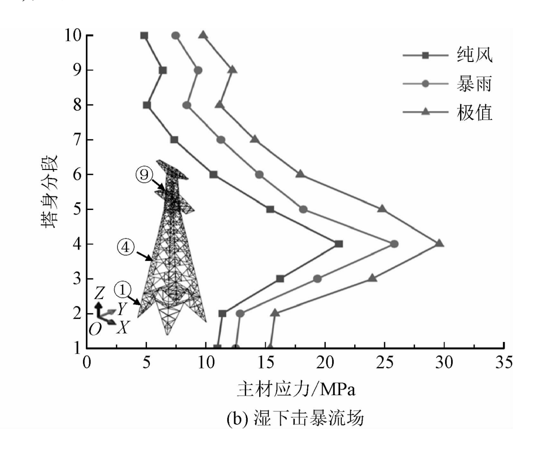


图 9　塔身各段主材应力分布

Fig. 9　Stress distribution of main materials in each section of tower body

应力分布在①段处较小,之后沿高度增长先增大,在④段达到最大值后,沿高度增长则趋于减小,在⑨段出现非线性增大现象,分析原因是由于①段塔身主材截面尺寸较大,整体稳定性较好;④段处于近地面塔身中下部,主材受较大的基底剪力以及来流外荷载作用,故应力分布最大;⑨段处为横担,由

于受荷面积突增而导致外荷载增大,且悬挂的绝缘子受导线两端张力差作用,引起应力出现非线性增大。对于良态风雨场,在极值降雨条件下,④段位置主材应力较纯风时增大了 11.64%,而在湿下击暴流场,较纯风时增大 37.07%。这是由于湿下击暴流靠近体系时,下沉气流携带大量雨滴猛烈冲击地面后向四周迅速扩散,使得塔线体系同时受 X 及 Y 两个方向的荷载作用,且在 Y 向,由于塔身横担部分与来流风雨接触面积最大,荷载增大效应最为显著;高柔性塔线体系在受双向强风雨作用时,风雨致振动造成塔体弯曲应力增大,且导线两端张力牵引也引起塔体出现显著的轴向应力,最终导致湿下击暴流场主材应力增幅明显。

4 结 论

本研究以耐张塔线体系为对象,对其在良态风雨场及湿下击暴流场中遭受不同降雨特征的动力响应进行数值模拟研究,获得了以下主要结论。

1)小雨强时塔顶位移均方根值增幅不明显,当降雨强度达到大暴雨级别后出现显著增幅,当降雨达到极值时在良态风雨场 X 向增幅可达到19.74%,湿下击暴流场 X 向增幅可达到 31.30%,Y 向增幅达到 33.43%。强风雨作用时段内整个体系的加速度幅值显著提升,将会对塔线结构稳定带来不利影响。

2)强降雨作用下,位移功率谱出现多个尖峰,表明塔线体系的耦合动力响应剧烈,产生多次体系共振反应。加速度功率谱相较于纯风作用时密度峰值剧增,良态风雨场的加速度功率谱主要分布于低频区域,湿下击暴流场在高频区频谱密度仍然较大。

3)极值降雨条件下,在良态风雨场中,关键位置主材应力较纯风时增大了 11.64%,在湿下击暴流场中,较纯风时增大了 37.07%。

参考文献:

[1] FU X, LI H N, WANG J. Failure analysis of a transmission tower subjected to combined wind and rainfall excitations[J]. The structural design of tall and special buildings, 2019, 28(10):e1615.

[2] 李锦华, 张焕涛, 杨文明, 等. 不同降雨环境下的斜拉索风雨激振响应研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4):1709-1716.
LI Jinhua, ZHANG Huantao, YANG Wenming, et al. Research on the rain wind induced vibration responses of stay cables considering different rainfall environments[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(4):1709-1716(in Chinese).

[3] FU X, LI H N, LI G, et al. Fragility analysis of a transmission tower under combined wind and rain loads[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2020, 199:104098.

[4] 王世民, 林友新, 李宏男. 风雨荷载作用下输电塔动力响应分析[J]. 结构工程师, 2012, 28(6):40-47.
WANG Shimin, LIN Youxin, LI Hongnan. Analysis of transmission tower dynamic responses under wind and rain loads[J]. Structural engineers, 2012, 28(6):40-47(in Chinese).

[5] 楼文娟, 王嘉伟, 卢明, 等. 运动雷暴冲击风下输电线风载计算参数[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2):371-378.
LOU Wenjuan, WANG Jiawei, LU Ming, et al. Wind load calculation parameter of transmission line in moving thunderstorm downburst[J]. Journal of Southeast University(natural science edition), 2016, 46(2):371-378(in Chinese).

[6] 李锦华, 余维光, 李春祥, 等. 非平稳非高斯湿下击暴流风雨荷载的模拟[J]. 计算力学学报, 2019, 36(1):27-34.
LI Jinhua, YU Weiguang, LI Chunxiang, et al. Simulation of wind rain loads of non-stationary non-Gaussian downburst accompanied with rain[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2019, 36(1):27-34(in Chinese).

[7] ZHOU C, LI L, LIU Y B. Characteristics of rainfall in wind field of a downburst and its effects on motion of high-voltage transmission line[J]. Shock and vibration, 2017, 2017:7350369.

[8] HOLMES J D, OLIVER S E. An empirical model of a downburst[J]. Engineering structures, 2000, 22(9):1167-1172.

[9] CHAY M T, ALBERMANI F, WILSON R. Numerical and analytical simulation of downburst wind loads[J]. Engineering structures, 2006, 28(2):240-254.

[10] 张鑫. 多类气候下耐张输电塔线体系风致动力响应研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.

[11] 王辉, 张鑫, 胡正生, 等. 大跨裙摆屋盖脉动风荷载特性数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5):1965-1971.
WANG Hui, ZHANG Xin, HU Zhengsheng, et al. Numerical simulation study on fluctuating wind load characteristics of long-span skirted roof[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(5):1965-1971(in Chinese).

(编辑 吕茵)